

Forum ILP, 27 Sep. 2021

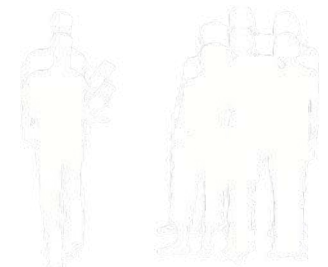
Controlling electric discharges with laser filamentation and the Laser Lightning Rod project

Pierre WALCH, Benoît MAHIEU, Magali LOZANO, Yves-Bernard ANDRE,
Laurent BIZET, Leonid ARANTCHOUK, André MYSYROWICZ, and **Aurelien HOUARD**
*Laboratoire d'Optique Appliquée, Groupe F-ILM,
CNRS - ENSTA Paris - Ecole polytechnique*

Thomas PRODUIT, Ugo ANDRAL, Victor MORENO, Jérôme Kasparian, Jean-Pierre Wolf
Université de Genève, Switzerland

Clemens Herkommer, Robert Bessing, Thomas Metzger,
TRUMPF Scientific Lasers, Unterföhring, Germany

aurelien.houard@polytechnique.edu

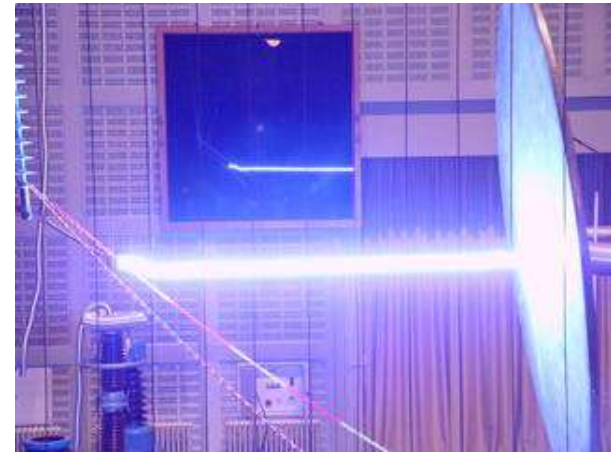


Plan de la présentation

1. Laser fs et filamentation
 1. Applications des filaments dans l'air
2. Contrôle de décharges électriques par lasers
 1. Mécanismes et résultats obtenus en labo
 2. Schémas possibles d'amélioration
3. Le projet FET-OPEN Laser Lightning Rod
 1. Résultats LAL
 2. Expérience sur le Mont Saentis



E.T.J. Nibbering, et al., Optics Letters **21**, 62-64, (1996)

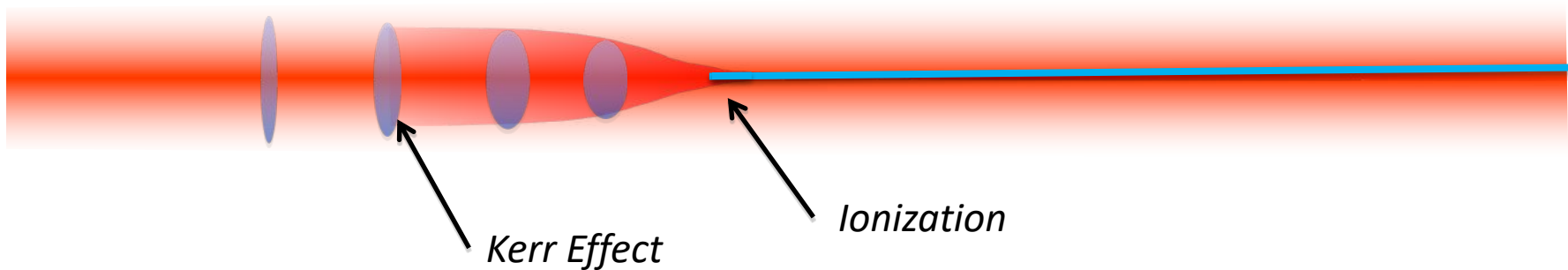


Filamentation laser femtoseconde dans l'air

$$P > P_{cr} = \frac{3,72\lambda^2}{8\pi n_0 n_2} \approx 5\text{GW}$$

In air at 800 nm

Collimated beam



Nonlinear propagation: formation of a filament

Braun et al. en 1995 (CUOS)
Nibbering et al. en 1996 (LOA)

Dynamical competition between:

- Self-focusing by Kerr effect
- Diffraction
- Multiphoton absorption
- Plasma defocusing

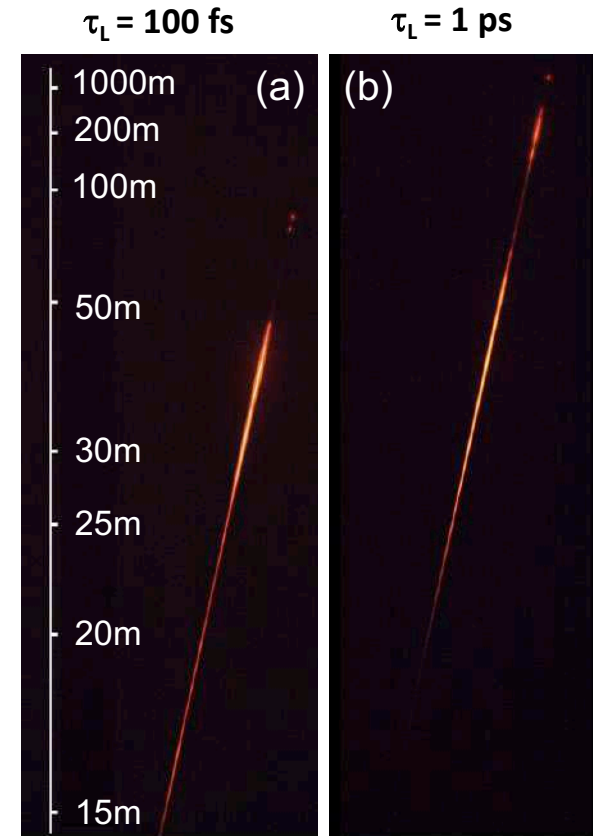
→ Intensité élevée dans le Coeur du filament : $I = 10^{13}-10^{15} \text{ W/cm}^2$

→ Colonne plasma longue et uniforme : $N_e = 10^{16} \text{ e-/cm}^3$

Différentes applications des filaments

1. Impulsion laser femtoseconde

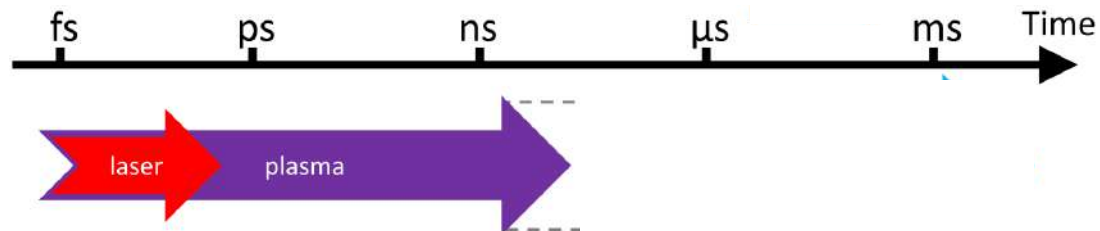
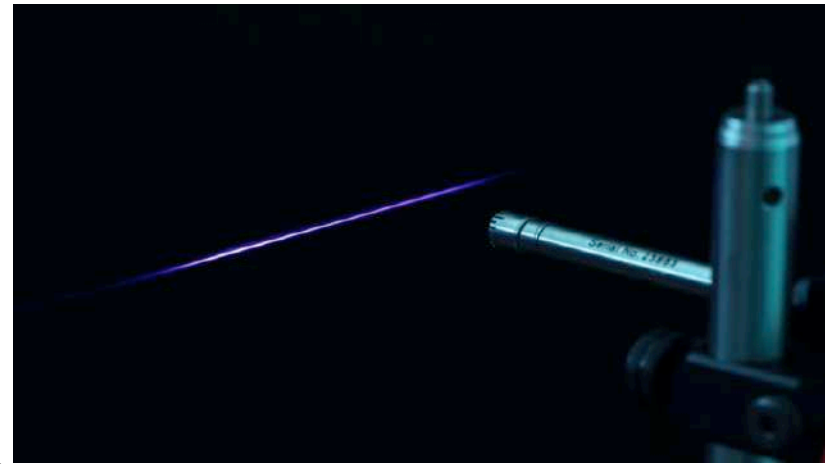
1. Génération de continuum et compression d'impulsion
2. Interaction laser à distance (LIPS, contre-mesure optronique)



Luminescence from plasma
filaments (Teramobile project,
2004)

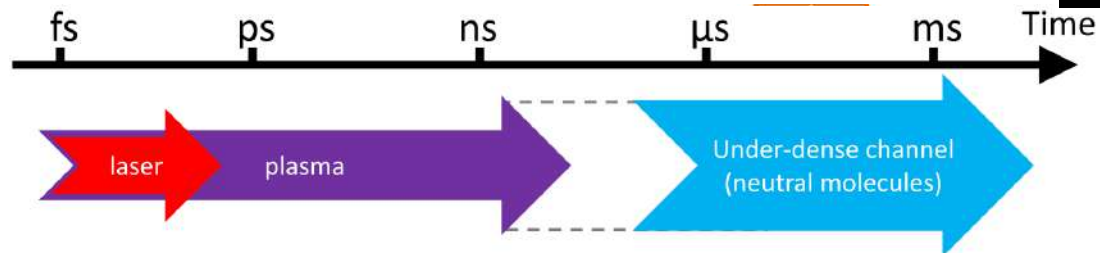
Différentes applications des filaments

1. Impulsion laser femtoseconde
 1. Génération de continuum et compression d'impulsion
 2. Interaction laser à distance (LIPS, contre-mesure optronique)
2. Colonne de plasma
 1. Rayonnements secondaires (pulse THz, gain laser dans l'azote)
 2. Guide d'onde, antenne plasma



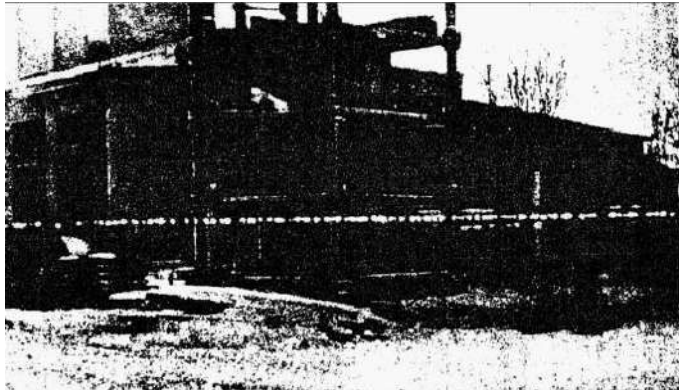
Différentes applications des filaments

1. Impulsion laser femtoseconde
 1. Génération de continuum et compression d'impulsion
 2. Interaction laser à distance (LIPS, contre-mesure optronique)
2. Colonne de plasma
 1. Rayonnements secondaires (pulse THz, gain laser dans l'azote)
 2. Guide d'onde plasma, antenne plasma, déclenchement de décharges
3. Effets hydrodynamiques et colonne de gaz de basse densité
 1. Guide d'onde optique
 2. Contrôle d'écoulements
 3. Guidage de décharges électriques

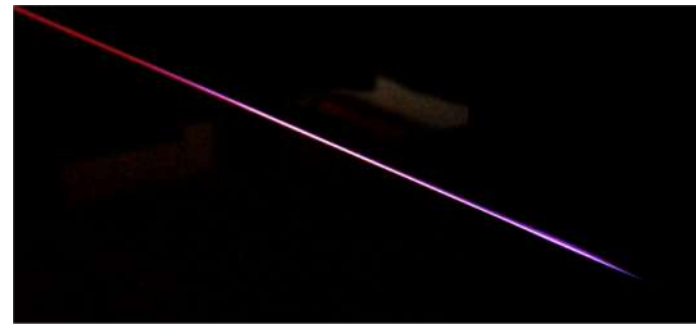


Contrôle de décharges électriques par laser

State of the art



160 J, 30 ns CO₂ laser (Parfenov et al. 1976)



10 mJ, 50 fs TiSa laser (LOA)

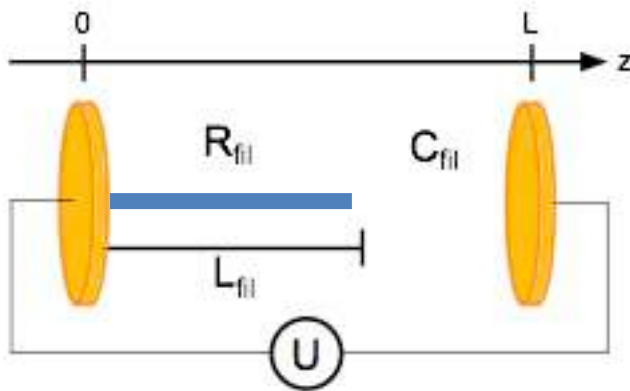
- Lasers à impulsions longues (70's-80s, Russie, USA, Japon)
- Démonstration de guidage de décharge avec un laser UV fs (Zhao et al. 1994, USA)
- Plusieurs projets sur le guidage par filamentation laser TW pour le contrôle de la foudre : INRS (Canada), Teramobile (Franco-allemand), Fujii et al. (Japon)

Mécanismes de guidage de décharges

1. Effet des électrons libres plasma

1. Conductivité: $R \approx 1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$
2. Durée de vie $< 1 \text{ ns}$

– Polarisation du plasma dans un long gap



$$\tau_{pot} = R_{fil} C_{fil} = \frac{2\pi\epsilon_0 R_{fil} L_{fil}^2}{\ln(L_{fil}/r_{fil})} \approx 500 \text{ ns.}$$



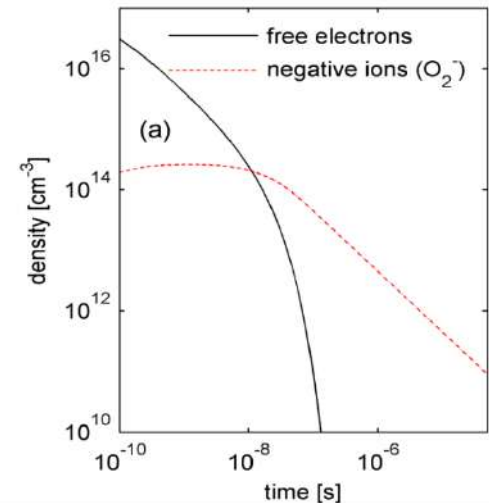
Mécanisme de guidage par laser

2. Effet des électrons attachés sur les molécules : O_2^-

- Longue durée de vie, et faible énergie d'attachement
- Peuvent accélérer la propagation de leaders ou de streamers

Comtois *et al.* IEEE (2003)

- Pas de mise en évidence claire de leur effet pour l'instant en laboratoire

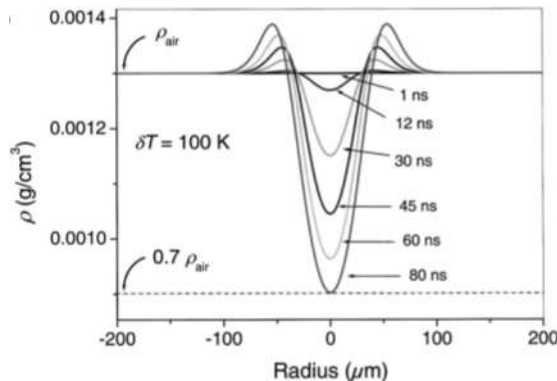


X. M. Zhao *et al.*, IEEE J. Quantum.
Electron. **31** (1995)

Mécanisme de guidage par laser

Effet hydrodynamique

- Heating of gas during filamentation (ionization, joule heating, Raman absorption..)
- Hydrodynamic expansion of the hot channel



F. Vidal, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **28**, 418 (2000)

Tzortzakis *et al.*, PRE **64**, 057401 (2001)

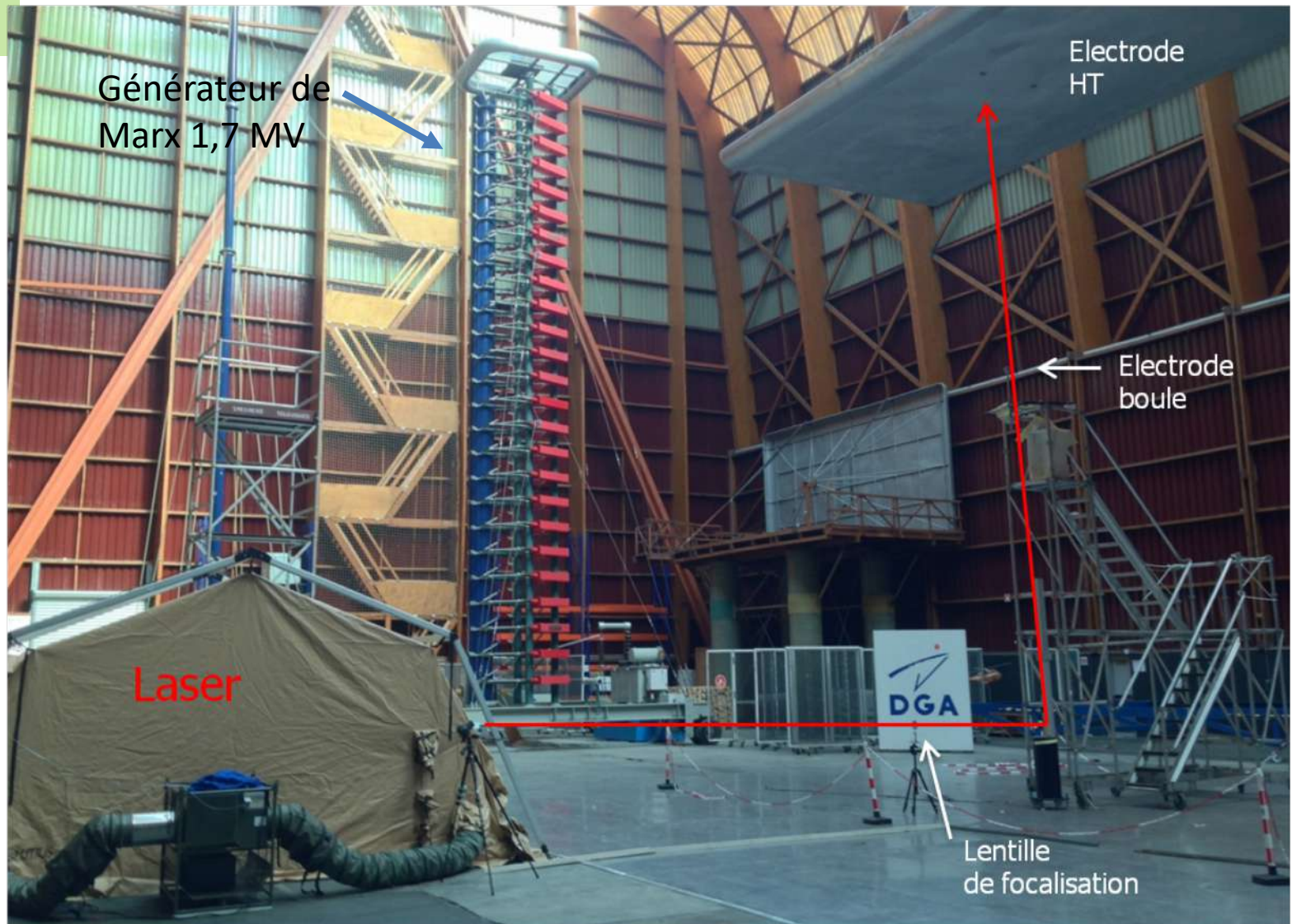
Point *et al.*, J. Phys. B **48**, 094009 (2015)

- Diminution of air density in the long channel formed by the filament
- Paschen's law and Peek's correction: breakdown voltage proportional to n_n

**⇒ Filamentation triggers breakdown along a defined path
with a lower breakdown voltage**

Guidage de décharges métriques

Toulouse
2014

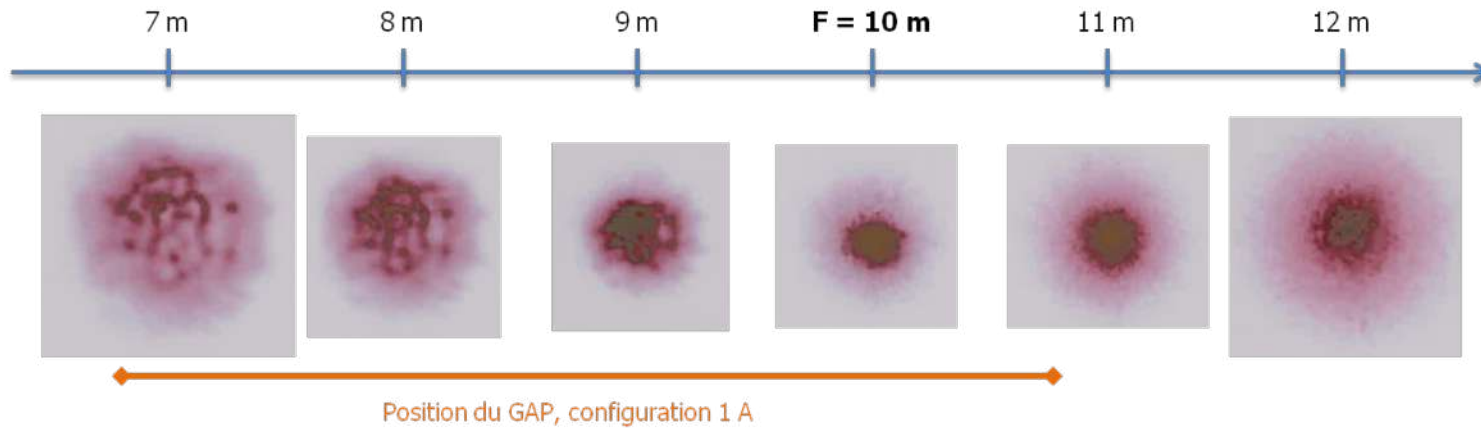


Guidage de décharges métriques

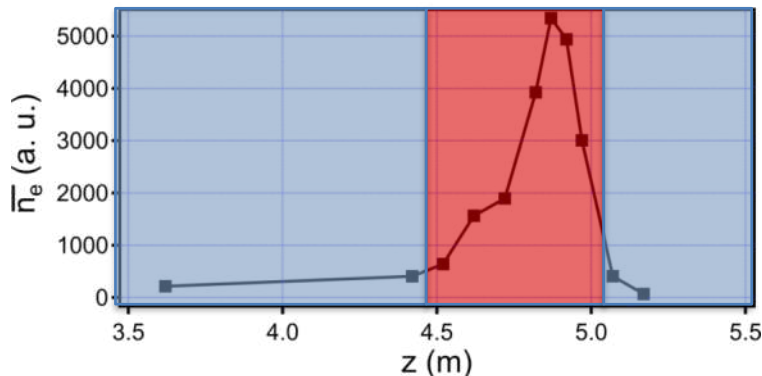
Filamentation TW et superfilamentation

Lineic deposited energy $> 1 \text{ mJ/cm}$
 Neutral temperature $> 1000 \text{ K}$

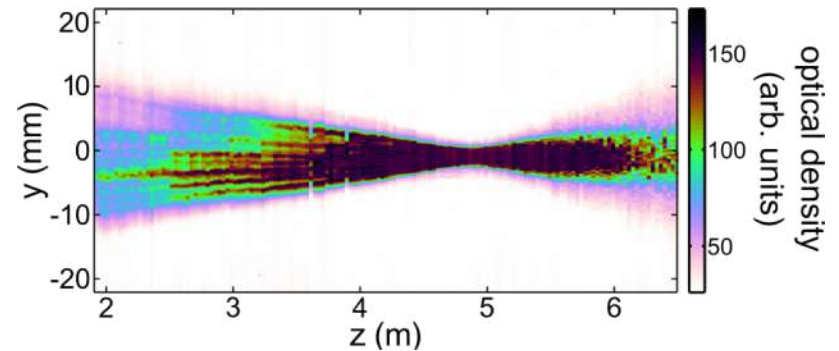
$E = 200 \text{ mJ}$, $\tau = 500 \text{ fs}$, $F = 10 \text{ m}$,



Average electronic density



Intensity distribution



G. Point, *et al.*, Superfilamentation in Air, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 223902 (2014).

Guidage de décharges métriques

Expériences en laboratoire

- Très reproductible avec laser en monocoup
- Pas de limitation apparente de la longueur guidée
- Nécessite une bonne synchronisation avec la décharge
- Nécessite une bonne focalisation du faisceau
- Fonctionne avec un champ de l'ordre de 5-10 kV/cm

Foudre naturelle

- Echelle de 100-1000 m de long
- Champ électrique plus faible (100 -1000 V/cm)
- Temps de montée du champ plus long
- Pas de synchronisation possible



D = 4 m, 1.4 MV
200 mJ, 500 fs @800 nm

Forestier *et al.*, AIP Advances **2**, 012151 (2012)

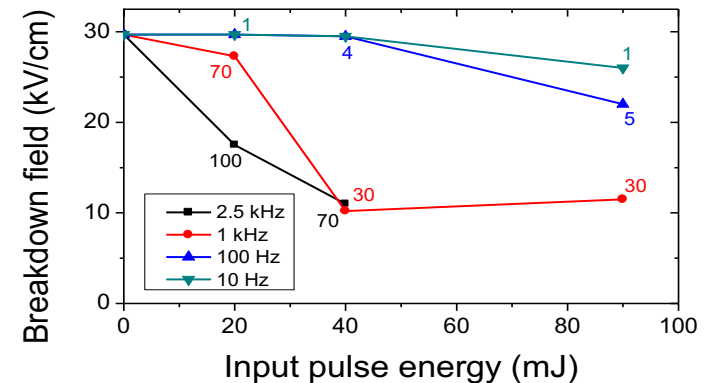
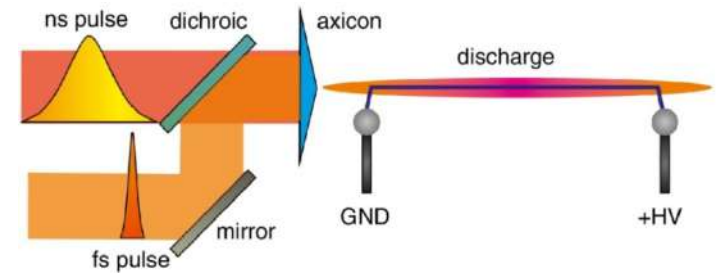
Vers le paratonnerre laser

Quelle source laser ?

2 solutions envisagées

1. Augmenter la densité du plasma et sa durée de vie : faire un conducteur qui se polarise et modifie le champ électrique
 - 10 kJ pour 100 m (en plus du laser fs)
1. Augmenter la cadence du laser pour obtenir des effets cumulatifs et un chauffage quasi continu
2. Augmenter l'énergie du laser pour faire des filaments plus long

Scheller et al., Optica (2014)



A. Houard et al., « Study of filamentation with a high power high repetition rate ps laser at $1.03 \mu\text{m}$, » Optics Express **24**, 7437 (2016)

The FET-OPEN Laser Lightning Rod project

Goal



Laser Lightning Rod

Control of real **lightning discharges**
with **laser filamentation** for **lightning protection**



FET-Open project
Horizon 2020

Projet européen coordonné par le LOA (A. Houard)
4 Meuros, 4 ans (5 ans finalement), démarré in 2017



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

TRUMPF



AMC



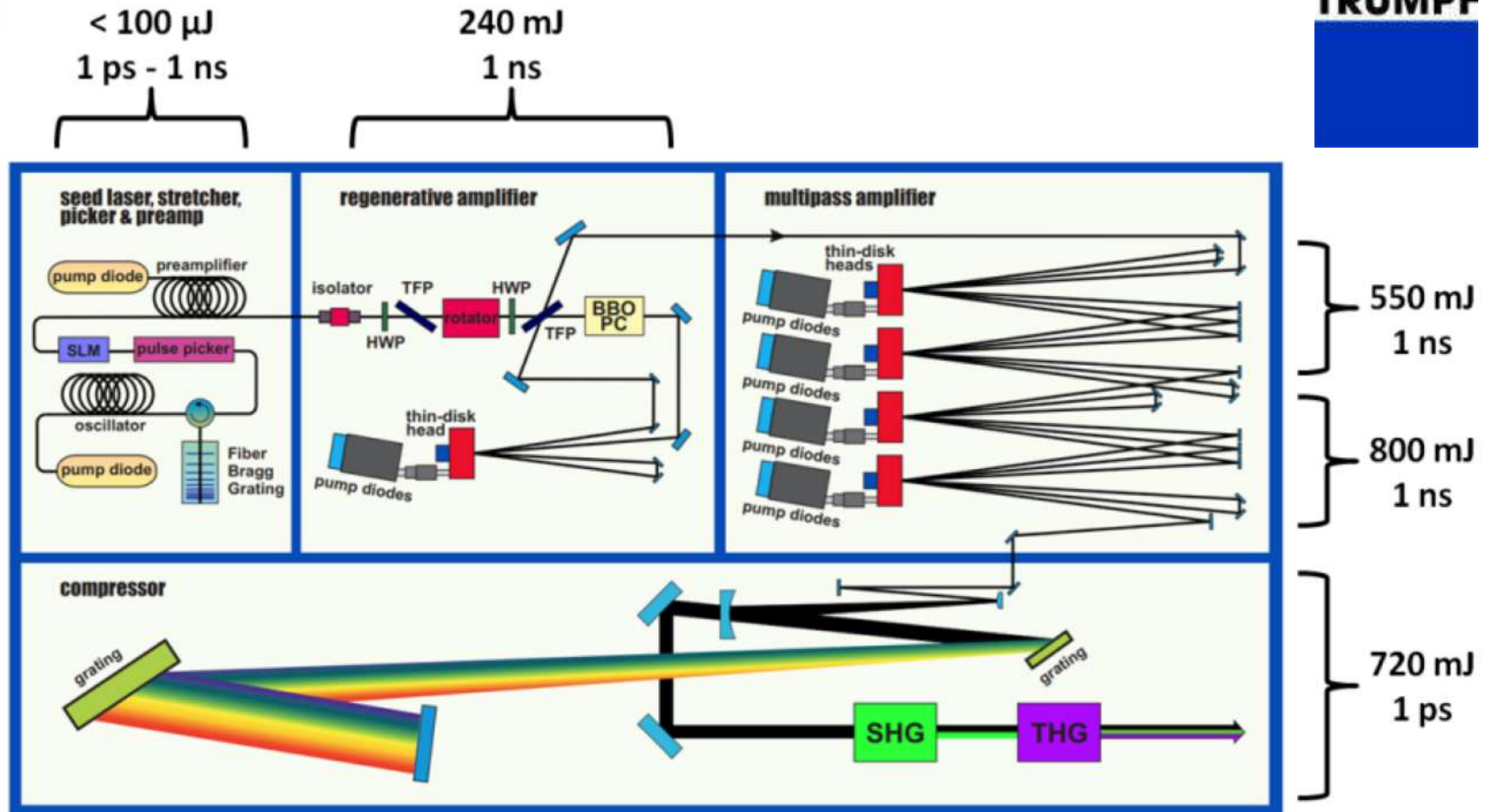
Hes·SO
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland



UMR 7639

The Laser Lightning Rod Laser system

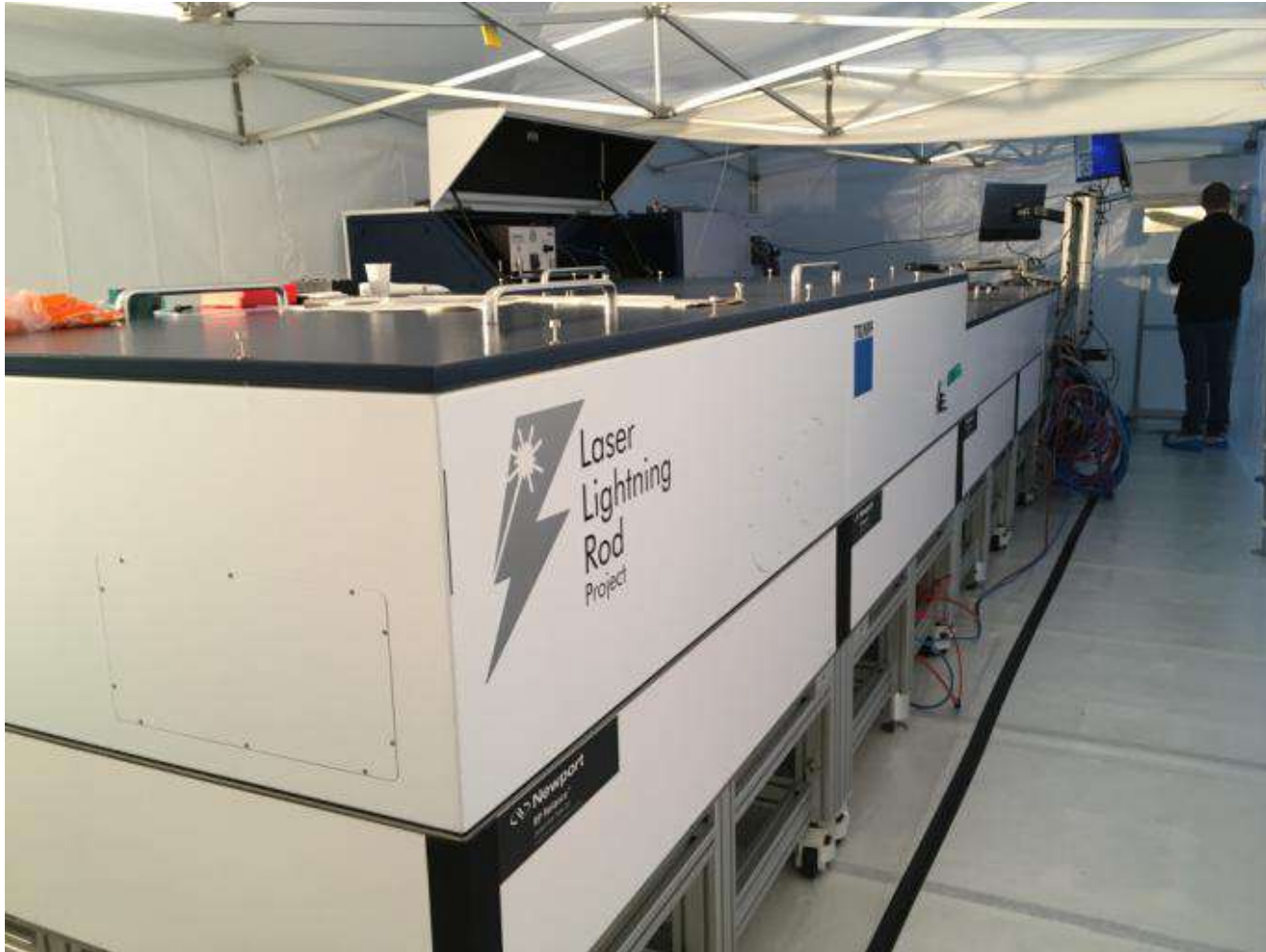
Compact high rep rate TW laser fully pumped by diodes



wavelength : **1030 nm**
pulse energy : **720 mJ**

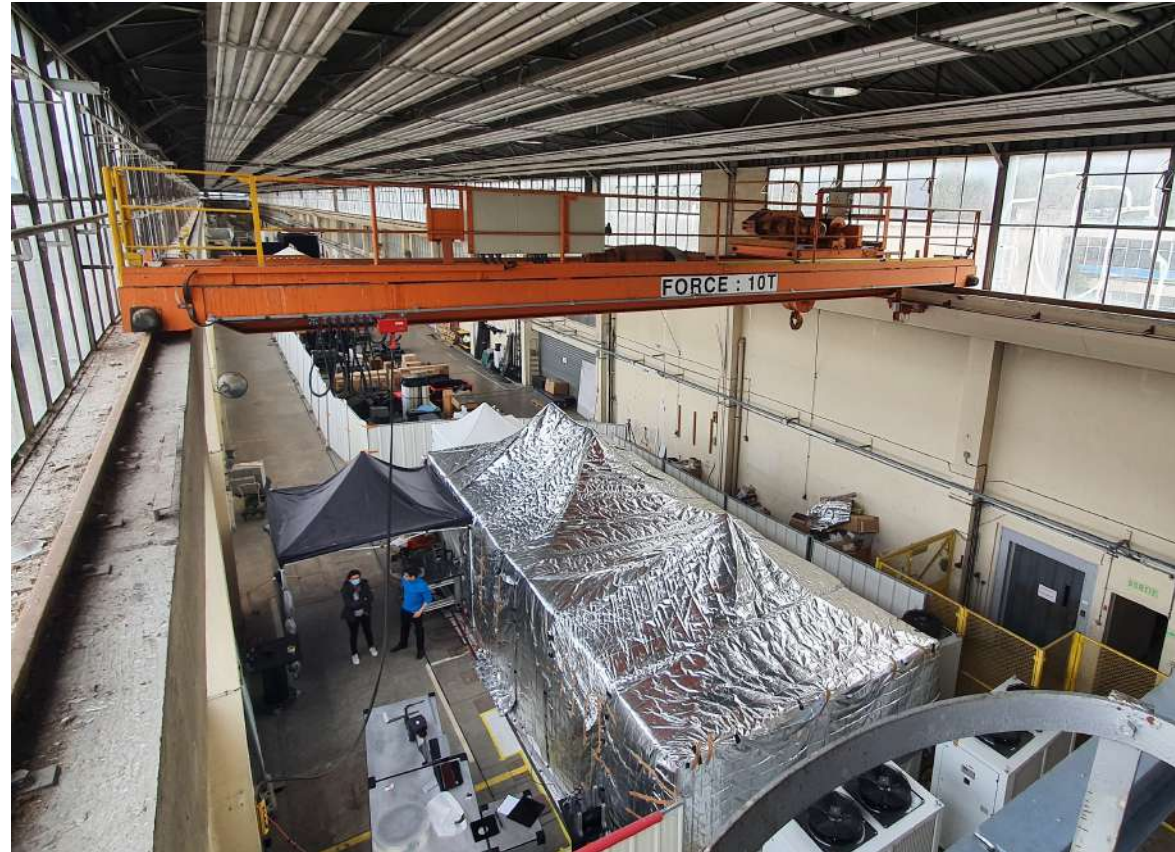
pulse duration : **1 ps**
repetition rate : **1 kHz**

LLR laser system (700 mJ, 1 kHz, 800 fs)



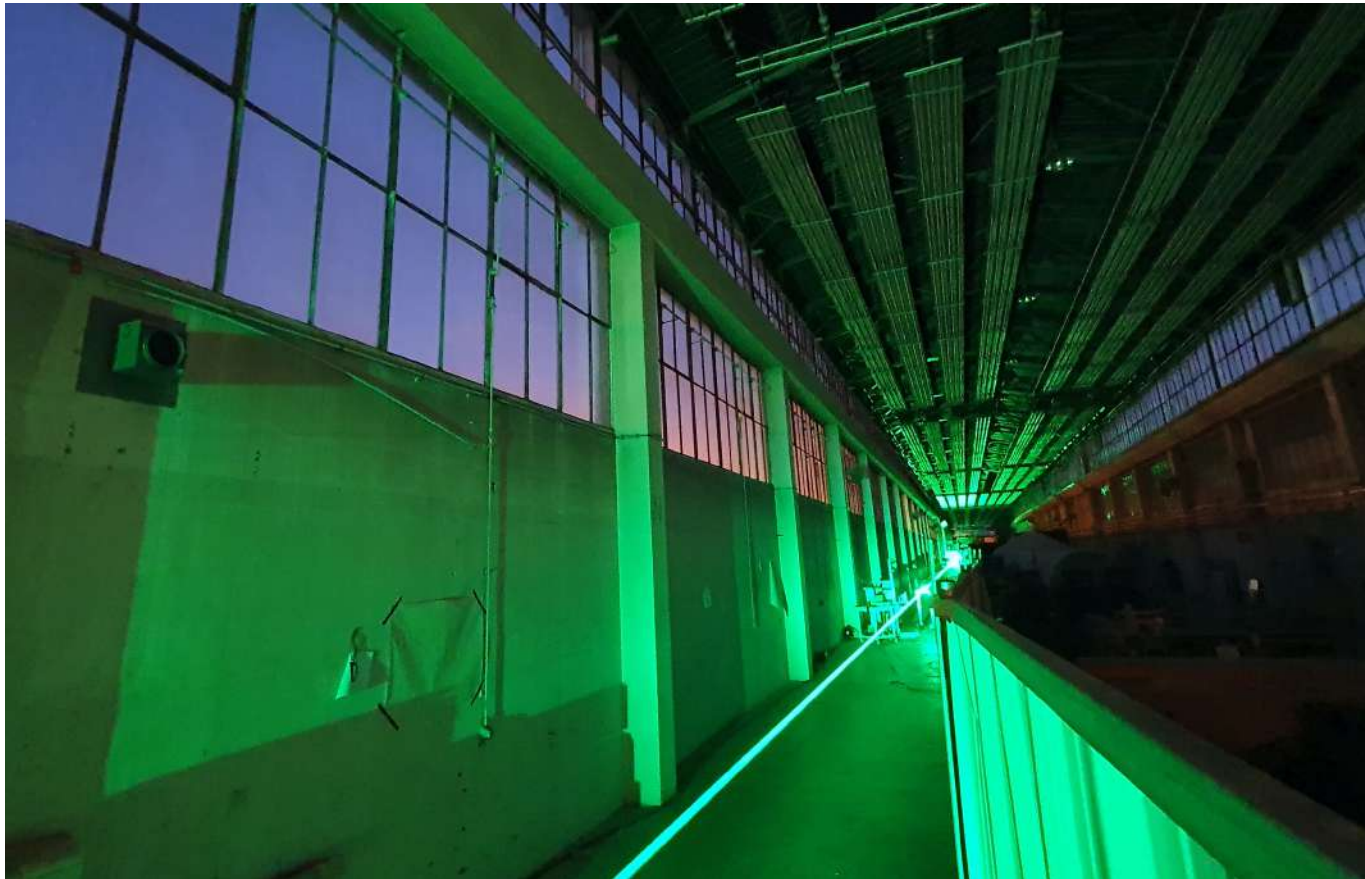
Caractérisation des filaments à longue distance : premiers tests au LAL

- **Octobre 2020 mars 2021**
 - Long distance propagation (>150 m)
- Test du laser
- Caractérisation des filaments à 110 m
- Préparation de l'expérience finale



Ancien accélérateur linéaire d'Orsay LAL (IJCLab)

Caractérisation des filaments à longue distance : premiers tests au LAL

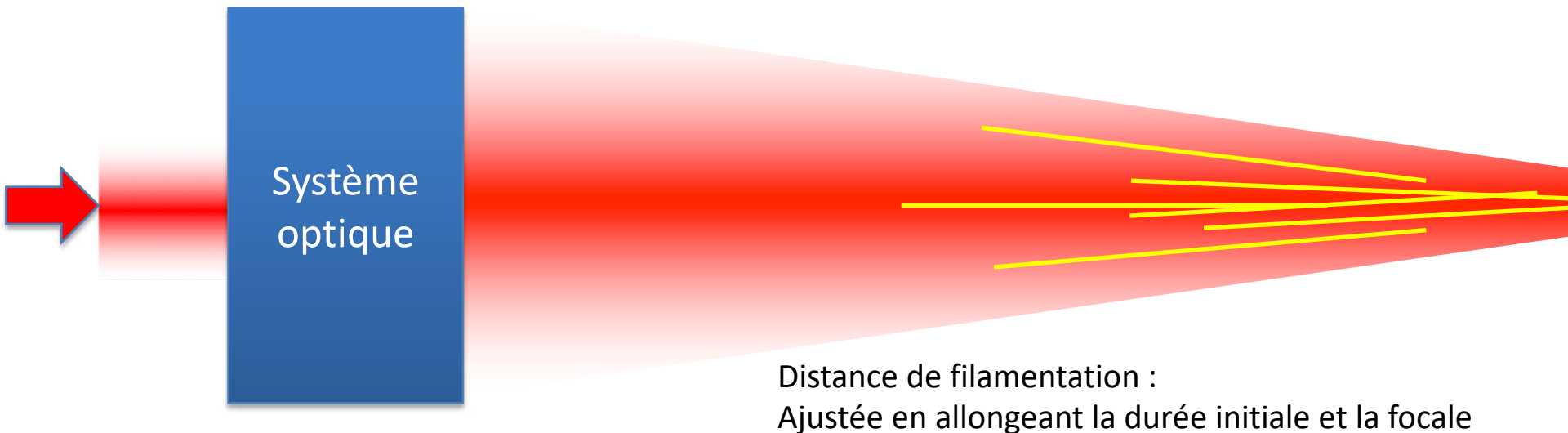


Filamentation TW à grande distance

1. Configuration faisceau colimaté



2. Configuration faisceau focalisé

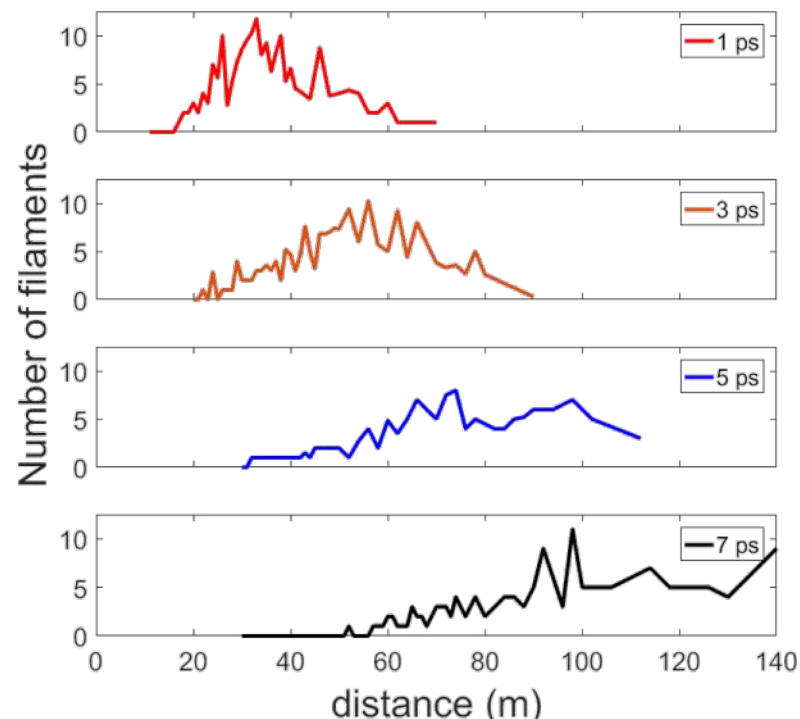
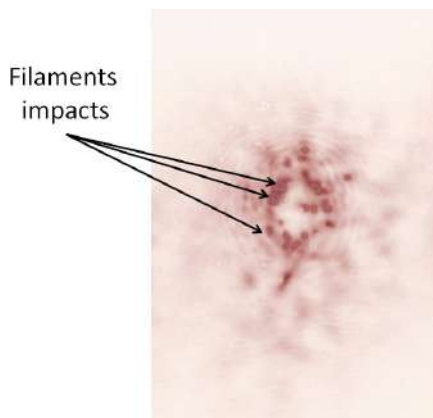


Filamentation du faisceau colimaté

Number of filaments

Measured by counting **impact on photosensitive paper**

⇒ for laser pulses of **500 mJ** and pulse duration ranging from **1 ps to 7 ps**



Filamentation at **1 ps** starts at **18 m** and occur **over 40 m**.

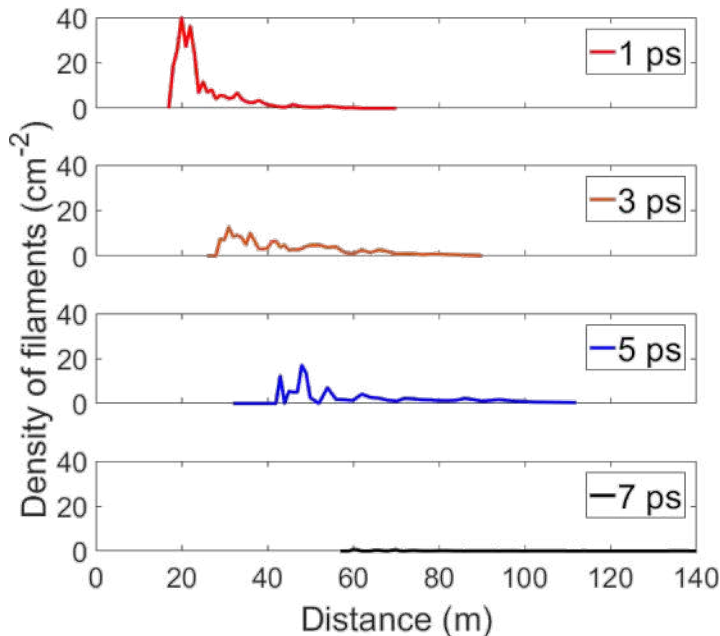
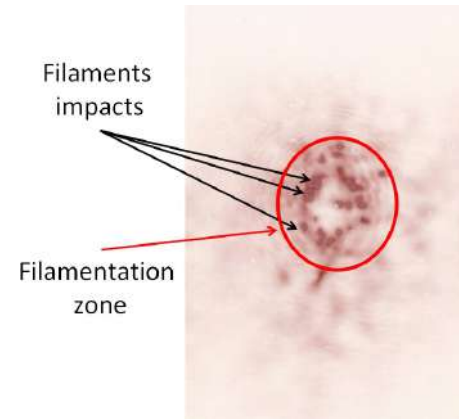
7 / 17

As pulse duration increases, filamentation start further away and occur over a longer zone.

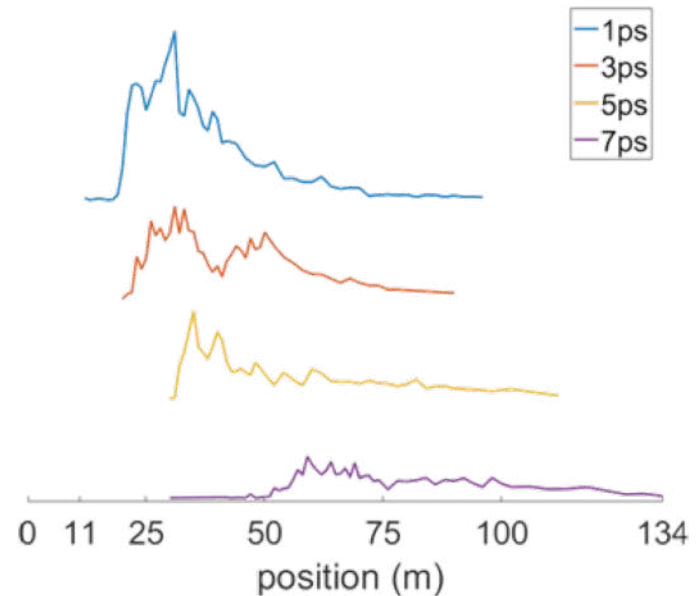
Filamentation of the collimated beam

Density of filament

$$\text{Density of filaments} = \frac{\text{Number of filaments}}{\text{Filamentation zone surface}}$$



Amplitude of the microphone signal



As pulse duration increases, filament density decreases.

Filaments produits avec le télescope

Surface occupée par filaments

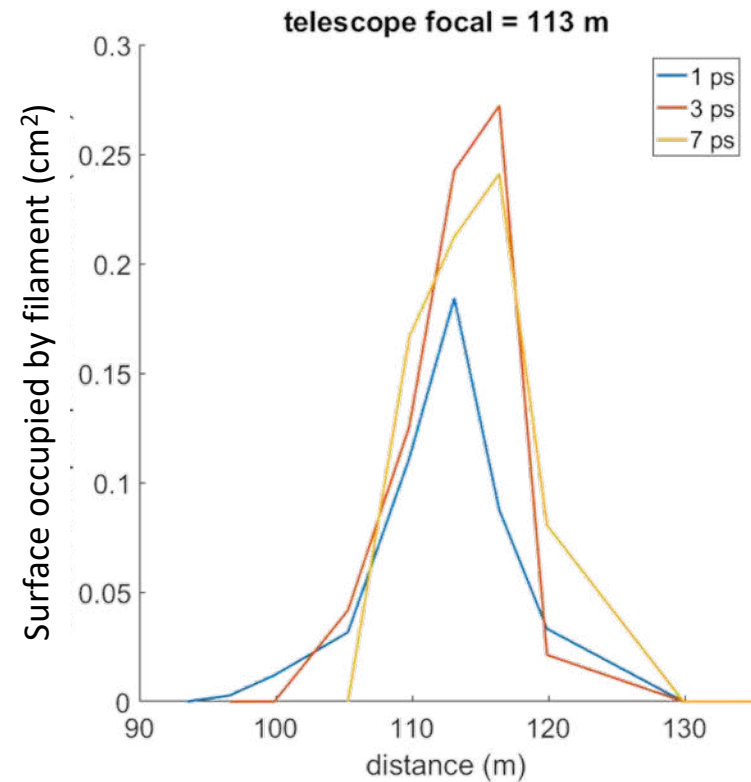
Measurement made

⇒ for laser pulses of **500 mJ**, focusing distance of **113 m**, and pulse duration ranging from **1 ps** to **7 ps**.

Surface occupied by filaments

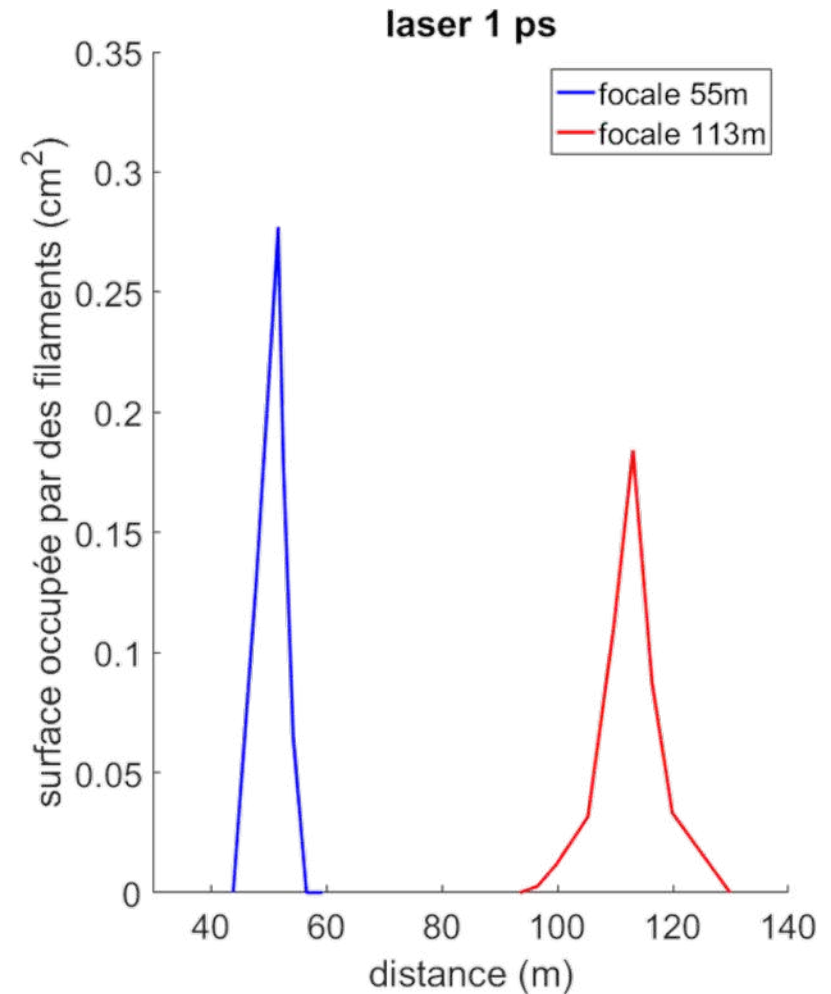


Filamentation starts **after 100 m** and occurs **over 30 m**.

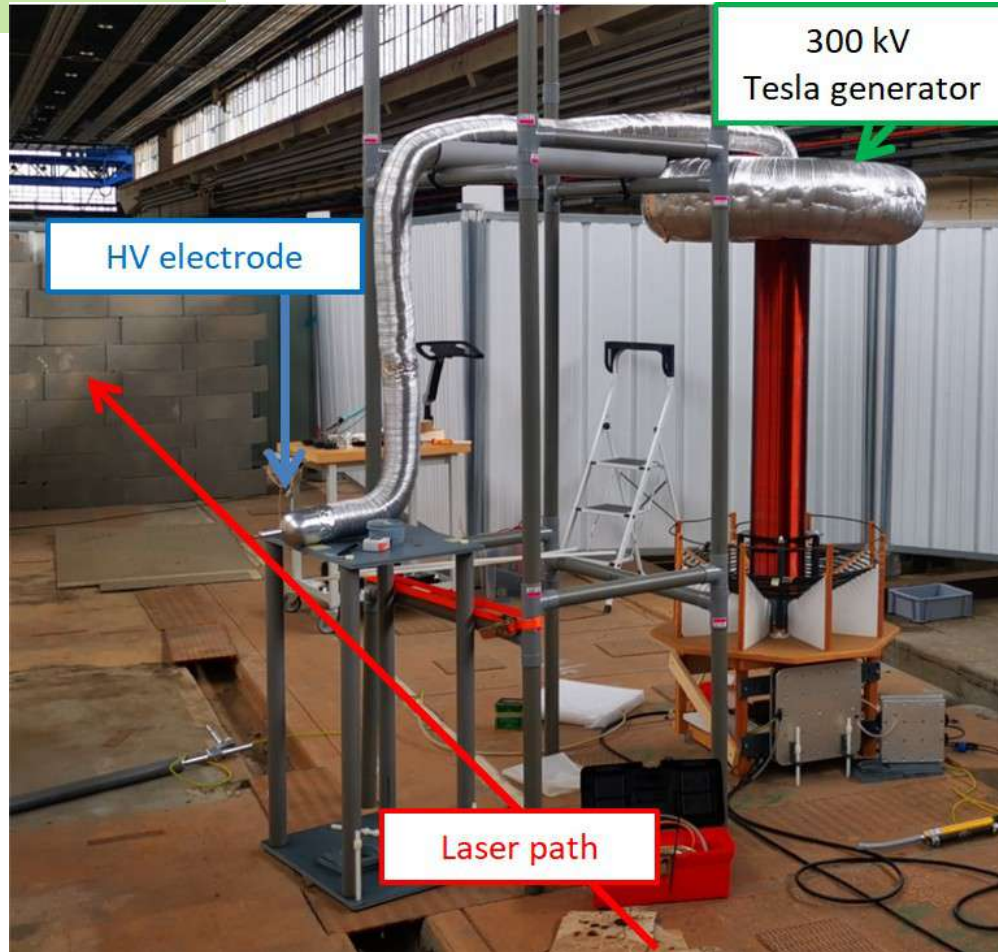


Filaments produits avec le télescope

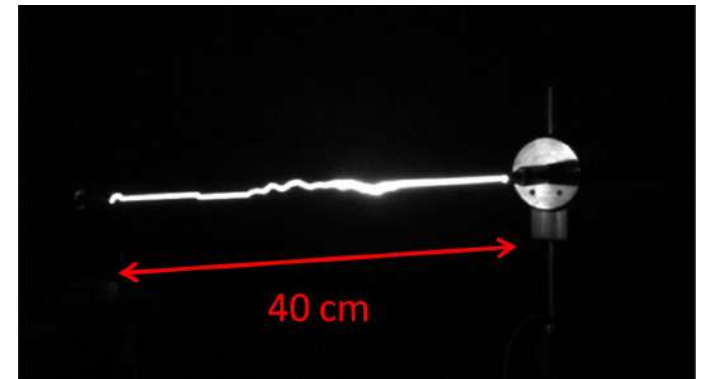
La filamentation est plus intense mais aussi plus courte avec le télescope



Guidage de décharges à distance avec le laser LLR

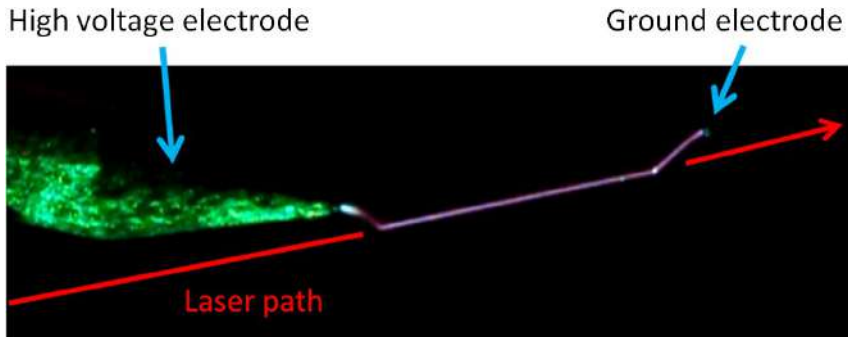


Photographie d'une décharge guidées par le laser Trumpf à 55 m



- Décharges guidées obtenues à 50 m mais pas à 100 m

Résultats de la 1ere campagne



Comparaison with/without the SHG at 55 m

Natural breakdown voltage : 30 kV

Breakdown voltage **without the SHG : 28.5**

kV Breakdown voltage with the SHG : 27.5
kV

- Le laser est capable de former des filaments au kHz à plus de 100 m et sur 30 m
- La focalisation est nécessaire pour obtenir des décharges guidées et le guidage est plus efficace avec la SHG
- Le chauffage de l'air par le laser est très important et rend difficile la caractérisation du plasma par interférométrie
- Les filaments produits semblent moins efficaces que ceux à 800 nm pour guider des petites décharges mais les effets thermiques et l'accumulations de charges résiduelles sont beaucoup plus importants (O₂⁻, électrons..)

LLR : SECONDE CAMPAGNE DE MESURE



LASER LIGHTNING ROD

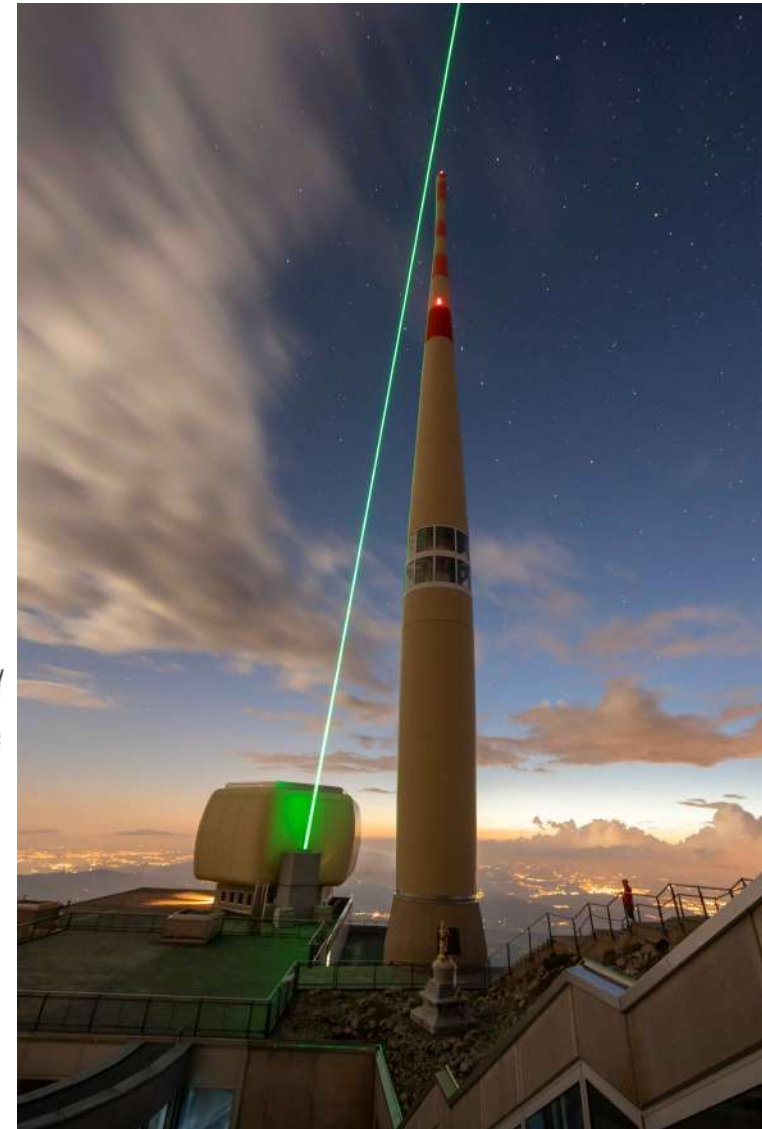
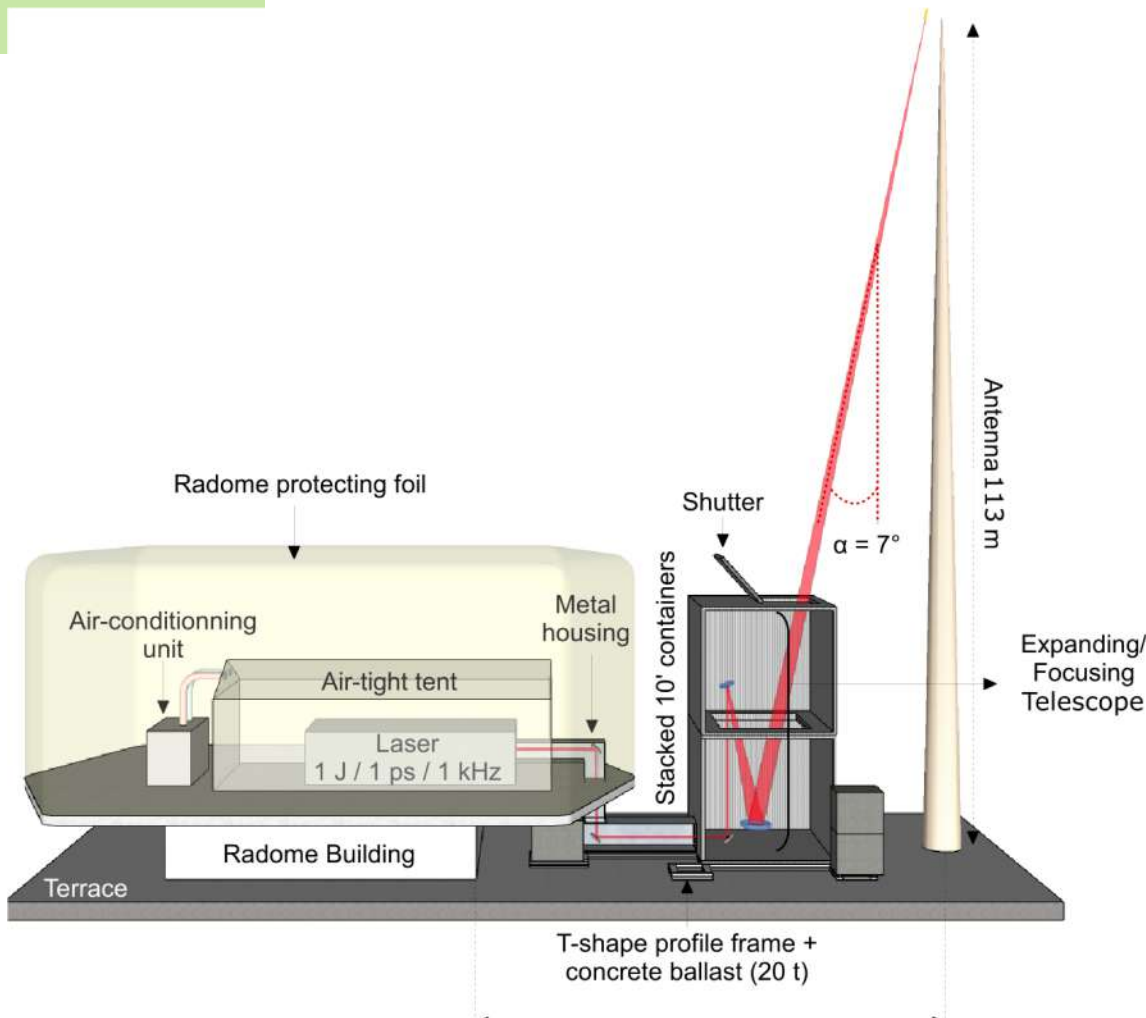
- Summer 2021: experimental lightning campaign on the Saentis station

Meteorological station of Saentis (Switzerland)

- Altitude 2 500 m
- Fully instrumented for the detection of lightning
- 100 lightning strikes every year
- Many events of upward lightning leader



Expérience sur le Mont Saentis installation du laser



Produit et al., EPJ AP 93, 10504 (2021)

Expérience sur le Mont Saentis (mai-octobre 2021)



- Installation en mai
- Début des essais avec laser fin juillet
- Fin de la campagne : début octobre
- Résultats actuellement en cours d'analyse



 Laser Lightning Rod

Visit our website
www.llr-fet.eu

